

Peningkatan Kontras Citra Bawah Air Menggunakan Metode CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)

Asep Sugiharto¹, Febryawan Yuda Pratama², Fanissa Narita³, Suhendri⁴, Dikka Syahrial Wiguna⁵

^{1,2,3} Program Studi Teknik Rekayasa Informatika Industri, Politeknik Jatiluhur Purwakarta

^{4,5} Program Studi Bisnis Digital, Politeknik Jatiluhur Purwakarta,

Griya Ebony Campaka No. 1, Purwakarta, Jawa Barat – Indonesia

asepsugiharto@polijati.ac.id, febryawanpratama@polijati.ac.id, fanissa@polijati.ac.id, suhendri@polijati.ac.id, dikka@polijati.ac.id

Abstrak— Kualitas citra bawah air umumnya buruk akibat penyerapan dan penyebaran cahaya di lingkungan perairan, yang menyebabkan keterbatasan jarak pandang kamera dan menghasilkan citra dengan kontras rendah, warna kabur, serta informasi visual yang berkurang. Maka dari itu penyerapan cahaya oleh air laut dan penyebaran cahaya oleh partikel kecil di lingkungan air laut telah menjadi sebuah rintangan dari penelitian citra bawah air dengan kamera. Hal ini dikarenakan memberikan dampak keterbatasan jarak pandang kamera dalam air laut. Citra atau gambar air bawah laut memang menjadi pekerjaan menantang karena kendala utamanya adalah kualitas gambar rusak karena penyerapan cahaya dan penyebaran cahaya. Peningkatan kualitas kontras citra pada dasarnya meningkatkan persepsi atau kemampuan menerjemahkan informasi gambar untuk manusia dan memberikan masukan “lebih baik” pada teknik pengolahan citra otomatis yang lain. Penelitian ini mengusulkan metode Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) untuk meningkatkan kontras citra bawah air khususnya pada ekosistem terumbu karang. Metode CLAHE bekerja dengan membagi citra ke dalam tile-tile kecil, membentuk histogram tiap region, memotong histogram dengan clip limit, mendistribusikan excess ke bagian lain, dan melakukan interpolasi bilinear antar tile. Eksperimen dilakukan terhadap 200 frame citra bawah air berukuran 1280×720 piksel menggunakan MATLAB. Hasil pengukuran menggunakan SURF feature points menunjukkan rata-rata PTS original sebesar 1.198,67 dan rata-rata PTS CLAHE sebesar 1.503,91. Pengujian statistik dengan SPSS v20 menghasilkan analisis varian image original sebesar 62.210,198 dan CLAHE sebesar 68.800,110 dengan nilai signifikansi 0,000 dan korelasi 0,999. Hasil ini membuktikan bahwa metode CLAHE secara signifikan meningkatkan kualitas kontras citra bawah air tanpa merusak informasi citra asli.

Kata Kunci— CLAHE, Citra Bawah Air, Peningkatan Kontras, Histogram Equalization, SURF Feature Points.

Abstract— Underwater image quality is generally poor due to light absorption and scattering in the aquatic environment, resulting in limited camera visibility and low-contrast images. Therefore, light absorption by sea air and light scattering by small particles in the sea air environment have become obstacles to underwater image research with cameras. This is because it has an impact on the limited visibility of the camera in sea air. Underwater images or pictures are indeed a challenge because the

main obstacle is image quality is damaged due to light absorption and light scattering. Increasing the quality of image contrast essentially improves the perception or ability to translate image information to humans and provides “better” input to other automatic image processing techniques. This study proposes the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) method to enhance the contrast of underwater images, particularly in coral reef ecosystems. CLAHE operates by dividing the image into small tiles, forming histograms for each region, clipping histograms at a defined clip limit, redistributing excess pixels, and performing bilinear interpolation between tiles. Experiments were conducted on 200 underwater image frames of 1280×720 pixels using MATLAB. Measurements using SURF feature points showed an average original PTS of 1,198.67 and an average CLAHE PTS of 1,503.91. Statistical testing with SPSS v20 yielded variance analysis of 62,210.198 for the original image and 68,800.110 for CLAHE, with a significance value of 0.000 and a correlation of 0.999. These results prove that CLAHE significantly improves underwater image contrast quality without degrading the original image information.

Keywords—CLAHE, Underwater Image, Contrast Enhancement, Histogram Equalization, SURF Feature Points.

I. PENDAHULUAN

Citra bawah air merupakan objek penelitian yang penuh tantangan karena faktor utama yang mempengaruhi kualitasnya adalah penyerapan cahaya dan penyebaran cahaya oleh partikel di lingkungan air laut. Menurut Zhou et al. [2], pengaruh absorpsi dan hamburan cahaya dalam medium air menyebabkan kabur pada detail gambar serta distorsi warna, yang dapat mengurangi efektivitas sistem computer vision untuk inspeksi visual dan pengenalan objek. Fenomena ini memberikan dampak berupa keterbatasan jarak pandang kamera dalam air serta menghasilkan gambar dengan kualitas kontras yang rendah, warna kabur, dan informasi visual yang berkurang.

Citra (image) merupakan gambar pada bidang dwimatra (dua dimensi) yang merupakan komponen multimedia penting sebagai bentuk informasi visual. Terdapat peribahasa yang menyebutkan bahwa sebuah gambar bermakna lebih dari seribu kata. Namun, citra yang mengalami penurunan mutu akibat

noise, blurring, atau kontras rendah menjadi lebih sulit diinterpretasi. Dalam hal pengenalan wajah (*face recognition*) berguna untuk mengidentifikasi wajah dalam sistem keamanan, sistem pengawasan, dan aplikasi komersial. Pengenalan wajah merupakan bidang penelitian yang aktif, karena semakin penting di berbagai bidang dan memiliki banyak tantangan[3]

Pengolahan citra digital merupakan proses yang bertujuan untuk memanipulasi dan menganalisis citra dengan bantuan komputer. Salah satu teknik dalam pengolahan citra adalah image enhancement, yaitu proses meningkatkan kualitas citra agar lebih mudah diinterpretasi oleh manusia maupun mesin. Dalam konteks lingkungan bawah air, peningkatan kualitas citra memiliki aplikasi yang luas mulai dari pemantauan ekosistem terumbu karang, eksplorasi laut dalam, hingga operasi kendaraan bawah air otonom (AUV/ROV) [4] [5][6].

Sebagian besar metode CLAHE tradisional menggunakan parameter tetap (*fixed parameters*), seperti *clip limit* dan *tile size*. Namun, kondisi bawah air sangat bervariasi tergantung pada tingkat kekeruhan (*turbidity*), kedalaman, dan pencahayaan. Sehingga masih terbatas penelitian yang mampu menyesuaikan parameter CLAHE secara otomatis dan dinamis berdasarkan estimasi kondisi air secara *real-time*. Sumber menyebutkan adanya kebutuhan akan model tuning parameter yang sadar lingkungan (*environment-aware*) untuk menghindari *over-enhancement* pada area terang atau *under-enhancement* pada area keruh [9],[14],[19].

Prinsip tujuan peningkatan kualitas kontras citra bawah air adalah memproses sebuah gambar sehingga hasilnya lebih sesuai daripada gambar aslinya untuk diterapkan pada aplikasi yang lebih khusus [1]. Sehingga diperlukan proses perbaikan kontras citra menggunakan metode CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization). Proses tersebut bertujuan untuk mendapatkan citra dengan kontras yang lebih baik tanpa mengurangi kualitas dari citra itu sendiri. [5].

Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) merupakan metode adaptif peningkatan kontras yang merupakan penyempurnaan dari Adaptive Histogram Equalization (AHE). Penyempurnaan dilakukan dengan memberlakukan tingkat klip (*clip limit*) terutama pada daerah homogen, sehingga dapat mencegah noise over-enhancement dan mengurangi efek edge shadowing. Beberapa penelitian terkini menunjukkan bahwa CLAHE tetap relevan sebagai komponen dasar dalam pipeline peningkatan citra bawah air bahkan ketika dikombinasikan dengan teknik deep learning [7] [8].

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan metode CLAHE dalam meningkatkan kontras citra bawah air terumbu karang, serta membuktikan secara statistik bahwa metode ini menghasilkan kualitas citra yang lebih baik dibandingkan citra original

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen dengan tahapan: (1) pengumpulan data berupa video bawah air, (2) konversi video ke frame citra, (3) pengolahan awal data dengan ekstraksi fitur menggunakan MATLAB, (4) penerapan metode

CLAHE, (5) pengujian dan evaluasi hasil menggunakan SPSS v20.

A. Data Penelitian

Data penelitian berupa satu sampel video bawah air dengan durasi 11 menit 05 detik. Video dikonversi ke dalam frame sehingga membentuk populasi image sebanyak 19.980 frame. Menggunakan rumus Slovin dengan toleransi error 10%, diperoleh sampel sebanyak 200 frame:

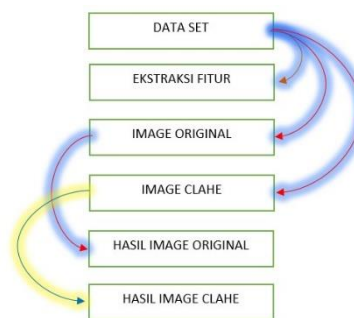
$$n = N / (1 + Ne^2) = 19980 / (1 + 19980 \times 0,01) \approx 200 \dots(3)$$

Dimensi tiap frame adalah 1280×720 piksel. Metode pengambilan sampel yang digunakan adalah simple random sampling dan stratified random sampling.

B. Implementasi MATLAB

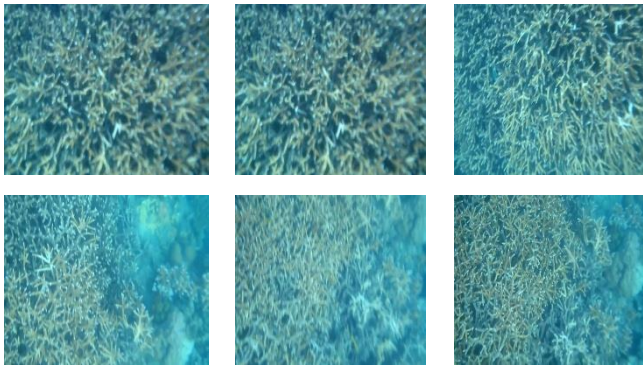
Implementasi metode CLAHE dilakukan menggunakan MATLAB. Alur program: membaca citra asli (*imread*), menerapkan histogram equalization (*histeq*), menyesuaikan intensitas (*imadjust*), mendeteksi fitur SURF pada citra original dan CLAHE (*detectSURFFeatures*), mengekstraksi fitur (*extractFeatures*), dan menampilkan histogram perbandingan.

Nilai PTS (Points) dari deteksi SURF features digunakan sebagai ukuran kualitas citra; semakin tinggi nilai PTS menunjukkan semakin banyak fitur yang terdeteksi. Pilihan SURF sebagai detektor fitur didukung oleh beberapa studi yang membuktikan korelasi kuat antara jumlah feature points SURF dengan kualitas visual citra bawah air [4] [11]. Langkah langkah eksperimen bias dilihat pada Gambar 1 berikut ini:



Gbr 1 Langkah-langkah eksperimen

- Pengumpulan Data (*Data Gathering*)**
Dalam penyusunan karya ilmiah ini, Penulis mengambil gambar sebanyak 200 citra bawah air.
- Pengolahan Awal Data (*Data Pre-processing*)**
Data perolehan di-transformasi untuk mendapatkan atribut yang relevan dan sesuai dengan format input algoritma. yaitu dilakukan ekstraksi fitur dengan coding matlab.
- Experimen dan Pengujian metode**
Experiment dilakukan terhadap 200 gambar citra bawah air, dimana dimensi gambar nya berukuran 1280×720 piksel dan gambar sampel dapat di lihat pada gambar 2 di bawah ini.



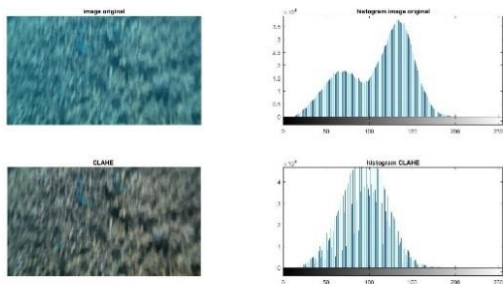
Gbr 2 Sampel Citra Bawah Air

Dari 200 gambar sampel yang di jadikan data set untuk dilakukan eksperimen.

- 1) Pada tahap ini data set akan diuji dengan metode CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mendapatkan nilai pts clahe untuk di uji serta dibandingkan dengan nilai pts image original .
- 2) Hasil akhir dari proses ini adalah nilai yang di bandingkan antara metode CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) dengan image original citra bawah air dari data set. Hasil Evaluasi dan pengujian metode tersebut.

d. Evaluasi

Evaluasi disini dilihat melalui statistika hasil dari pengujian untuk membandingkan histogram equalization dari metode CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) dengan image original dalam peningkatan kontras citra bawah air.



Gbr 3 Histogram Equalization

C. Analisis Statistik

Pengujian dilakukan menggunakan SPSS v20 dengan analisis regresi linier sederhana, koefisien korelasi Pearson (r), koefisien determinasi (R²), uji linieritas, dan analisis varian (ANOVA). Model regresi yang digunakan adalah $Y = A + BX$.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

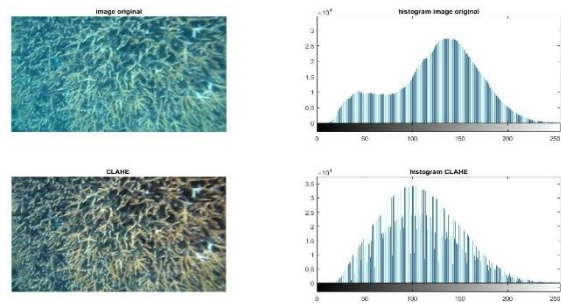
A. Hasil Pengujian tool Matlab

Pada bagian ini, hasil dari implementasi metode CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) kedalam tool MATLAB. Untuk menganalisis metode tersebut yang akan kita gunakan 200 gambar citra bawah air.

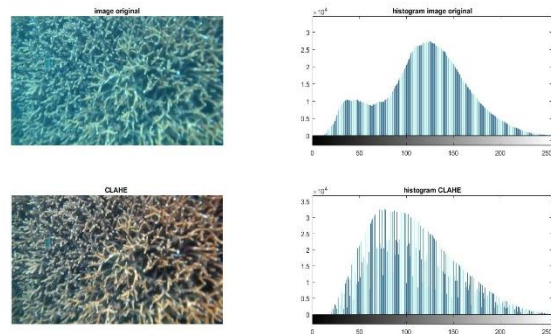
Penilaian kualitatif dari peningkatan kontras diperlukan bersama dengan penilaian kuantitatif. Hasil perbaikan kualitas citra hanya dapat dihargai jika citra yang dihasilkan memberi efek bagus dari tingkat pencahayaan yang cukup dalam penampilan citra asli.

Dengan penilaian kualitas visual yang dimiliki pencahayaan yang kurang, harus lebih di tingkatkan atau dilakukan dengan peningkatan tidak wajar. Hasil penilaian visual ukuran kualitas yang efektif untuk menilai kinerja algoritma peningkatan kontras.

Berikut hasil perbaikan kontras citra bawah air secara visual yang di tampilkan dengan menggunakan data dari frame 1 dan frame 2 dengan perbandingan perbedaan bahwa Histogram Equalization image clahe lebih renggang dibandingkan dengan Histogram Equalization image original atau image asli.



Gbr 4 hasil visual frame 1



Gbr 4 hasil visual frame 2

B. Hasil Deteksi Fitur SURF

Hasil perbaikan kontras citra bawah air secara visual ditampilkan menggunakan data dari frame 1 dan frame 2, dengan perbandingan bahwa Histogram Equalization image CLAHE lebih renggang dibandingkan dengan image original.

TABEL I
HASIL PTS ORIGINAL VS CLAHE (SAMPLE)

Frame	PTS Original	PTS CLAHE	Total PTS
1	988	1.227	2.215
2	1.000	1.220	2.220
10	709	892	1.601
20	659	887	1.546
30	998	1.368	2.366
40	2.293	2.603	4.896
50	2.488	2.406	4.894
100	2.683	3.054	5.737
150	2.527	2.839	5.366
200	380	569	949
Rata-rata	1.198,67	1.503,91	2.702,59
Maksimum	3.265	3.713	6.978
Minimum	29	245	274

Sumber: Hasil Pengolahan MATLAB, 2025

Berdasarkan Tabel I, rata-rata PTS image CLAHE (1.503,91) lebih tinggi dibandingkan rata-rata PTS image original (1.198,67). Hal ini menunjukkan bahwa metode CLAHE mampu mendeteksi lebih banyak fitur pada citra, yang mengindikasikan peningkatan kualitas informasi visual. Peningkatan sebesar 25,46% ini konsisten dengan temuan Guan et al. [11] yang membuktikan bahwa metode peningkatan citra berbasis histogram mampu meningkatkan kemampuan deteksi fitur pada citra bawah air.

C. Analisis Statistik Image Original

Statistik deskriptif image original menunjukkan rata-rata fitur terdeteksi sebesar 1.198,675 dengan standar deviasi 903,302 dari 200 sampel. Nilai korelasi Pearson antara PTS original terhadap total gabungan fitur adalah $r = 0,998$ yang artinya data signifikan terhadap semua populasi (mendekati 1). Analisis varian (ANOVA) pada image original menghasilkan nilai $F = 62.210,198$ dengan tingkat signifikansi $p = 0,000$. Jumlah kuadrat regresi sebesar 161.859.853,143 dengan error 515.160,732, menunjukkan error lebih kecil dibandingkan kuadrat regresi sehingga hasil penelitian akurat. Nilai $R^2 = 0,997$ artinya 99,7% variasi data dapat dijelaskan oleh model.

D. Analisis Statistik Image CLAHE

Statistik deskriptif image CLAHE menunjukkan rata-rata fitur terdeteksi sebesar 1.503,915 dengan standar deviasi 949,797 dari 200 sampel. Nilai korelasi Pearson antara PTS CLAHE terhadap total gabungan fitur adalah $r = 0,999$, lebih tinggi dibandingkan image original. Analisis varian (ANOVA) pada image CLAHE menghasilkan nilai $F = 68.800,110$ dengan tingkat signifikansi $p = 0,000$. Jumlah kuadrat regresi sebesar 179.005.630,823 dengan error 515.160,732. Nilai $R^2 = 0,997$ menunjukkan model regresi yang sangat kuat.

E. Perbandingan dan Pembahasan

Perbandingan analisis varian antara image original ($F = 62.210,198$) dan image CLAHE ($F = 68.800,110$) menunjukkan bahwa image CLAHE memiliki nilai F yang lebih tinggi. Hal ini membuktikan bahwa metode CLAHE secara statistik menghasilkan citra dengan kualitas yang lebih baik. Hasil ini sejalan dengan penelitian Mirza et al. [13] yang melakukan studi komparatif berbagai teknik histogram equalization dan menyimpulkan bahwa CLAHE secara konsisten menghasilkan kualitas gambar yang lebih baik dibandingkan HE konvensional.

Histogram image CLAHE lebih renggang dan terdistribusi lebih merata dibandingkan histogram image original yang cenderung terkonsentrasi pada nilai intensitas tengah. Distribusi yang lebih merata menunjukkan peningkatan kontras yang berhasil tanpa over-enhancement berkat mekanisme clip limit pada CLAHE. Fenomena ini sesuai dengan analisis Zhang et al. [2] dalam studi mereka tentang kombinasi white balance adaptif dan CLAHE untuk peningkatan citra bawah air.

CLAHE membagi gambar ke dalam 64 daerah non-overlapping (8×8) untuk gambar 512×512 , terdiri dari tiga kelompok: Corner Regions (CR), Border Regions (BR), dan Inner Regions (IR). Penggabungan dengan interpolasi bilinear menghasilkan transisi antar tile yang halus. Struktur adaptif ini merupakan keunggulan utama CLAHE dibandingkan metode global, karena mampu merespons karakteristik lokal citra bawah air yang bervariasi akibat distribusi cahaya yang tidak merata [14] [8].

Dalam konteks aplikasi yang lebih luas, peningkatan kontras menggunakan CLAHE pada citra terumbu karang memberikan manfaat signifikan bagi pipeline analisis otomatis. Penelitian Li et al. [12] menunjukkan bahwa kualitas citra yang ditingkatkan melalui pre-processing seperti CLAHE dapat meningkatkan akurasi segmentasi deep learning pada citra terumbu karang. Hal ini relevan mengingat ekosistem terumbu karang merupakan habitat laut yang kritis dan memerlukan pemantauan berkelanjutan menggunakan teknologi computer vision [15] [16].

Penting untuk dicatat bahwa CLAHE sebagai metode konvensional memiliki batasan tertentu. Penelitian terkini dari Er et al. [4] menunjukkan bahwa metode deep learning seperti GAN dan CNN mampu menghasilkan peningkatan citra bawah air yang lebih komprehensif, khususnya dalam hal koreksi warna dan pemulihan detail pada jarak jauh. Oleh karena itu, pengembangan ke depan dapat mempertimbangkan integrasi CLAHE sebagai komponen pre-processing dalam arsitektur deep learning yang lebih kompleks, sebagaimana dibuktikan efektivitasnya dalam studi Islam et al. [17] dan Sharma et al. [18].

Dari perspektif evaluasi kuantitatif, penelitian ini menggunakan jumlah feature points SURF sebagai metrik kualitas. Meskipun metrik ini efektif dalam mengukur kandungan informasi tekstural citra, penelitian masa depan disarankan untuk juga mempertimbangkan metrik PSNR, SSIM, UIQM, dan UCIQE untuk evaluasi yang lebih

komprehensif sesuai rekomendasi Jiang et al. [11] dan Chen et al. [19].

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian ini, Proses meningkatkan citra bawah air terbukti menjadi tantangan yang jauh lebih sulit untuk diatasi. Teknik-teknik peningkatan tradisional seperti pemerataan histogram menunjukkan keterbatasan yang kuat untuk tugas seperti itu. Dalam tulisan ini, peneliti mengusulkan metode peningkatan gambar bawah air yang efisien yang mampu meningkatkan gambar bawah air berdasarkan pada satu gambar bawah air yang terdegradasi. Jadi dapat disimpulkan berdasarkan pengujian terhadap 200 frame data set bahwa peningkatan kontras citra bawah air dengan menggunakan metode CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) ini dapat meningkatkan kualitas suatu citra tanpa merusak citra asli itu sendiri. Dan telah di uji untuk mengimplementasikan citra bawah air laut yang berkualitas kurang baik yaitu image original dengan analisis varian 62210.198 dapat dimanipulasi menjadi citra bawah air laut lain yang mempunyai kualitas lebih baik dengan image yang sudah menggunakan metode Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) dimana analisis variannya 68800,10 maka dapat disimpulkan secara data bahwa penelitian ini menunjukkan image clahe lebih baik daripada image original.

Untuk penelitian mendatang, disarankan untuk mengeksplorasi kombinasi CLAHE dengan metode deep learning seperti GAN atau arsitektur CNN, serta memperluas penerapan pada berbagai jenis objek bawah air. Evaluasi menggunakan metrik kualitas tambahan seperti PSNR, SSIM, UIQM, dan UCIQE akan memberikan penilaian yang lebih komprehensif terhadap kinerja algoritma peningkatan citra bawah air.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Lidong, Z. Wei, W. Jun, and S. Zebin, "Combination of contrast limited adaptive histogram equalisation and discrete wavelet transform for image enhancement," *Wiley Online Library* H Lidong, Z Wei, W Jun, S Zebin *IET image processing*, 2015 • *Wiley Online Library*, vol. 9, no. 10, pp. 908–915, Oct. 2015, doi: 10.1049/IET-IPR.2015.0150.
- [2] "J. Zhou, X. Zhao, and W. Zhang, "Underwater Image... - Google Scholar." Accessed: May 19, 2026.
- [3] T. Ayyavoo and J. J. Suseela, "Illumination pre-processing method for face recognition using 2D DWT and CLAHE," *Wiley Online Library* T Ayyavoo, J John Suseela *let Biometrics*, 2018 • *Wiley Online Library*, vol. 7, no. 4, pp. 380–390, Jul. 2018, doi: 10.1049/IET-BMT.2016.0092.
- [4] M. J. Er, J. Chen, Y. Zhang, and W. Gao, "Research challenges, recent advances, and popular datasets in deep learning-based underwater marine object detection: A review," *mdpi.com* M J Er, J Chen, Y Zhang, W Gao *Sensors*, 2023 • *mdpi.com*, vol. 23, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/S23041990.
- [5] X. Ji, G. P. Liu, and C. T. Cai, "Collaborative framework for underwater object detection via joint image enhancement and super-resolution," *mdpi.com* X Ji, GP Liu, CT Cai *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023 • *mdpi.com*, vol. 11, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/JMSE11091733.
- [6] S. Suhendri, A. W.-B. R. of Artificial, and undefined 2025, "Lobster Growth Monitoring with AI-Based Computer Vision Using SVM and Neural Network," *itscience-indexing.com*, vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.6210.
- [7] T. Gong, M. Zhang, Y. Zhou, and H. Bai, "Underwater image enhancement based on color feature fusion," *mdpi.com* T Gong, M Zhang, Y Zhou, H Bai *Electronics*, 2023 • *mdpi.com*, vol. 12, no. 24, Dec. 2023, doi: 10.3390/ELECTRONICS12244999.
- [8] "IJERT, "An Integrated Multi-Stage Framework for... - Google Scholar." Accessed: May 19, 2026.
- [9] P. Andono, I. Purnama, M. H.-J. of T. and, and undefined 2013, "Underwater image enhancement using adaptive filtering for enhanced sift-based image matching," *scholar.its.ac.id* PN Andono, IKE Purnama, M Hariadi *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013 • *scholar.its.ac.id*, Accessed: May 19, 2026. [Online]. Available: <https://scholar.its.ac.id/en/publications/underwater-image-enhancement-using-adaptive-filtering-for-enhance-2/>
- [10] E. Yuniarno, I. Purnama, ... P. A.-... on C. &, and undefined 2016, "Underwater Coral Reef Color Image Enhancement Based on Polynomial Equation.," *openurl.ebsco.com*, Accessed: May 19, 2026.
- [11] "Y. Guan et al., "Fast Underwater Image Enhancement... - Google Scholar." Accessed: May 19, 2026.
- [12] "M. Li et al., "A Survey on Underwater Coral Image... - Google Scholar." Accessed: May 19, 2026.
- [13] "M. W. Mirza, A. Siddiq, and I. R. Khan, "A Comparative... - Google Scholar." Accessed: May 19, 2026.
- [14] Y. Chang, C. Jung, P. Ke, H. Song, J. H.-I. Access, and undefined 2018, "Automatic contrast-limited adaptive histogram equalization with dual gamma correction," *ieeexplore.ieee.org* Y Chang, C Jung, P Ke, H Song, J Hwang *Ieee Access*, 2018 • *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: May 19, 2026.
- [15] "A. Alshahrani et al., "Classification of Coral... - Google Scholar." Accessed: May 19, 2026.
- [16] "J. Sauder, C. Chateau, M. Adjeroud, and N. Mouquet... - Google Scholar." Accessed: May 19, 2026.
- [17] M. Islam, Y. Xia, J. S.-I. robotics and automation letters, and undefined 2020, "Fast Underwater Image Enhancement for Improved Visual Perception," *ui.adsabs.harvard.edu*, Accessed: May 19, 2026.
- [18] "P. Sharma, S. Garg, and R. Shrivastava, "WaveNet:... - Google Scholar." Accessed: May 19, 2026.

- [19] T. Chen, X. Yang, N. Li, T. Wang, and G. Ji, "Underwater image quality assessment method based on color space multi-feature fusion," *nature.com* T Chen, X Yang, N Li, T Wang, G Ji *Scientific reports*, 2023 • *nature.com*, vol. 13, no. 1, p. 16838, Dec. 2023, doi: 10.1038/S41598-023-44179-3.
- [20] Gogireddy, Y. R., & Gogireddy, J. R. (n.d.). *Advanced Underwater Image Quality Enhancement via Hybrid Super-Resolution Convolutional Neural Networks and Multi-Scale Retinex-Based Defogging Techniques* .
- [21] Narla, V. L., Gulivindala, S., Sahu, G., & Telagarapu, P. (2025). *A Hybrid Approach with CLAHE and Dark Channel Prior for Enhancing Underwater Images*. 12(03), 1654–1663.
- [22] Yang, Z., Yang, S., Fu, Y., & Jiang, H. (2026). *Research on an Underwater Visual Enhancement Method Based on Adaptive Parameter Optimization in a Multi-Operator Framework*. 1–20.